

بررسی ریزساختاری فوم نانوکامپوزیتی آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم تولید شده با استفاده از امواج مافوق صوت

اکرم صالحی^{*}، سید مجتبی زبرجد^۲، ابوالفضل باباخانی^۳ و محمدصادق ابروی^۴

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از امواج مافوق صوت نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم (SiO_2) تولید شد و سپس با استفاده از روش فوم سازی مستقیم مذاب و با به کارگیری عامل فوم ساز هیدرید تیتانیم (TiH_2)، فوم نانوکامپوزیتی Al-SiO_2 تولید گردید. در ادامه، بررسی‌های ریزساختاری جهت اطمینان از تولید فوم نانوکامپوزیتی و ارزیابی نقش نانوذرات بر مورفولوژی و ضخامت دیواره سلول‌ها به وسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی انجام پذیرفت. با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری، پدیده ریزش مذاب در حین فوم سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش، ساختارهای چند وجهی سلول‌ها و توزیع مناسب نانوذرات در دیواره سلول‌ها را با استفاده از ارزیابی‌های میکروسکوپی نشان داد. هم‌چنین مشاهده شد که ضخامت دیواره سلول‌ها و مساحت ناحیه پلاتو با فاصله گرفتن از سطح نمونه ریخته‌گری شده، تغییر می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: امواج مافوق صوت، فوم نانوکامپوزیت، بررسی‌های ریزساختاری، پدیده ریزش مذاب

^۱ - کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد و عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد.

^۲ - استاد گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۳ - دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

^۴ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد.

* - نویسنده مسئول مقاله: am_salehi85@yahoo.com

پیشگفتار

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به فوم‌های فلزی به عنوان یک ساختار سبک با قابلیت جذب انرژی در صنایع گوناگون نظیر خودروسازی، هوافضا، صنایع نظامی و... شده است. روش‌های تولید فوم‌های فلزی بسیار متنوع است. در این بین تکنیک‌های فوم سازی مستقیم مذاب با استفاده از عامل فوم ساز برای تولید در ابعاد صنعتی مناسب می‌باشد، چرا که دسترسی به تجهیزات تولید در آن آسان و هزینه آن به مراتب کمتر از سایر روش‌ها است [۱-۳].

نمی‌توان مذاب فلزات را به آسانی و با افزودن عامل فوم ساز به فوم تبدیل کرد. حرکت و جذب مذاب به سمت پایین دیواره حباب‌ها معمولاً خیلی سریع رخ می‌دهد و نمی‌تواند برای مدت زمانی طولانی پایدار باقی بماند و منجر به تخریب فوم می‌شود. می‌توان عنوان کرد که یکی از مهمترین خواص فیزیکی فوم که با عوامل همزمان بسیاری مانند شکل، اندازه منطقه پلاتو^۱ و خواص فصل مشترکی گاز و مذاب کنترل می‌شود، پدیده ریزش^۲ است. ریزش مذاب در راستای مناطق پلاتو منجر به افزایش فشارهای مویبگی شده که باعث به هم پیوستن حباب‌ها و در نتیجه تشکیل حفرات داخلی بزرگ در نمونه فومی می‌شود. به این ترتیب لازم است جهت ممانعت از خروج و یا پیوستن حباب‌های گازی به یکدیگر، ویسکوزیته مذاب افزایش یابد. افزودن ذرات کوچک نامحلول و یا ذراتی که به آرامی حل می‌شوند، ویسکوزیته مذاب آلومینیوم را زیاد می‌کنند و مانع از حرکت مذاب در غشاء حباب می‌شوند که به پایداری فوم منجر می‌شود [۴-۶].

ذرات سرامیکی اضافه شده در فرایند فوم سازی، همواره در ابعاد میکرون بوده‌اند که استفاده از مقادیر بالای این ذرات در فوم سازی، باعث می‌شود انعطاف پذیری به شدت کاهش یابد. یکی از موارد جالب برای استفاده از نانوذرات سرامیکی به عنوان فاز تقویت کننده، کاربرد آنها برای استحکام بخشی زمینه فلزی است درحالی‌که انعطاف پذیری خوبی را نیز حفظ می‌کنند که به این پیش

ماده فوم سازی، نانو کامپوزیت زمینه فلزی (MMNC)^۳ گفته می‌شود [۷-۸].

فرایند ترکیب کردن نانوذرات با استفاده از امواج مافوق صوت^۴ که بر مبنای روش ذوبی^۵ بوده و اخیراً معرفی شده است، روشی مناسب برای پخش یکنواخت نانوذرات و تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشد. امواج مافوق صوت بصورت موج سینوسی از میان یک مذاب عبور کرده و سیکل انبساط ایجاد شده در اثر آن، یک فشار منفی را روی مذاب ایجاد می‌کند که مولکول‌ها را به دور از یکدیگر می‌کشد. اگر موج ایجاد شده به اندازه کافی شدید باشد، سیکل انبساط ایجاد شده می‌تواند حفراتی را در مذاب ایجاد کند که به این فرایند حفره‌زایی^۶ زایی^۶ گفته می‌شود. به خاطر نوع سینوسی میدان موج صوتی، حباب‌های گازی کوچک ایجاد شده، حالت‌های متناوب انبساط و انقباض را تجربه می‌کنند. اگر اندازه حباب، توان موج ایجاد شده و یا فرکانس، بیش‌تر از یک آستانه خاص بشوند، فرایند حفره‌زایی^۷ گذرا^۷ ایجاد می‌شود شود (شکل ۱) [۹-۱۰].

در این فرایند، حباب‌ها مدت زیادی پایدار نیستند و فشار ایجاد شده در مراحل بعدی باعث ترکیدن حباب‌ها می‌شود. این همان پدیده انفجار حفره^۸ است که می‌تواند یک محیط غیر معمولی را برای واکنش‌های شیمیایی ایجاد کند. لحظه انفجار را نقطه داغ^۹ می‌نامند که می‌تواند به‌گونه مقطعی دمایی تا حدود ۵۰۰۰°C و فشار ۱۰۰۰ atm و نرخ گرم کردن و سرد کردن بیش‌تر از K/s^{۱۰} را ایجاد کند که به‌گونه موثری نانوذرات را در فلزات آلیاژی پراکنده کرده و ترشوندگی آنها را افزایش می‌دهد. بنابراین، ساخت محصولات ریخته‌گری شده نانوکامپوزیتی با کارایی بالا را به‌گونه عملی امکان‌پذیر می‌سازد. از امواج مافوق صوت حتی می‌توان به عنوان یک عامل حذف کننده حفرات گازی در ریخته‌گری فلزات استفاده کرد [۱۱-۱۳].

³- metal matrix nanocomposites

⁴- Ultrasonic

⁵- Melt route

⁶- Cavitation

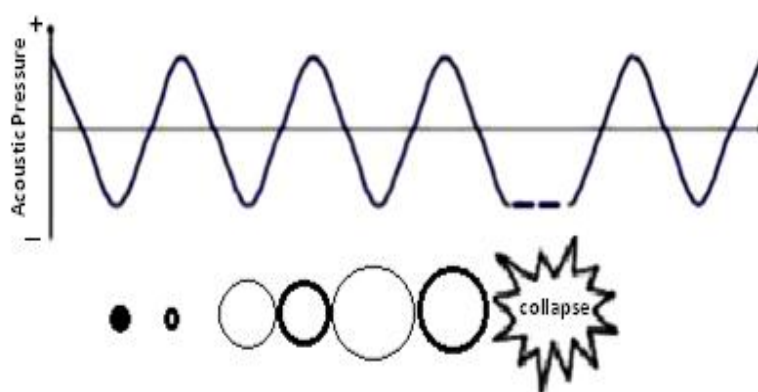
⁷- Transient cavitation

⁸- Implosion of the cavity

⁹- Hot spot

¹- Plateau border

²- Drainage



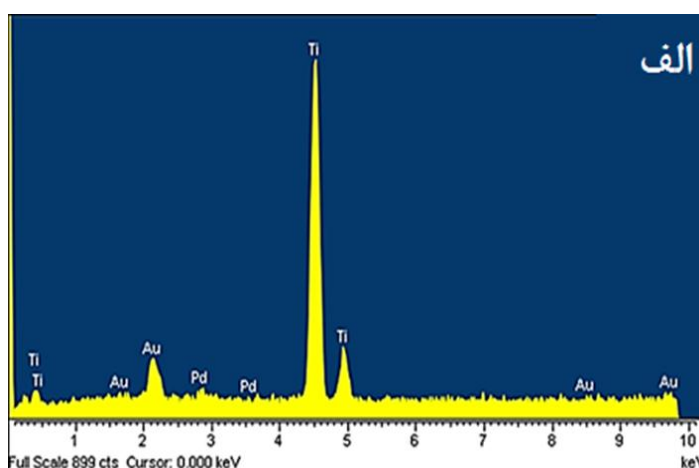
شکل ۱- تغییر اندازه حباب‌ها و انفجار حباب‌های ایجاد شده تحت تاثیر امواج صوتی درون ماده [۹].

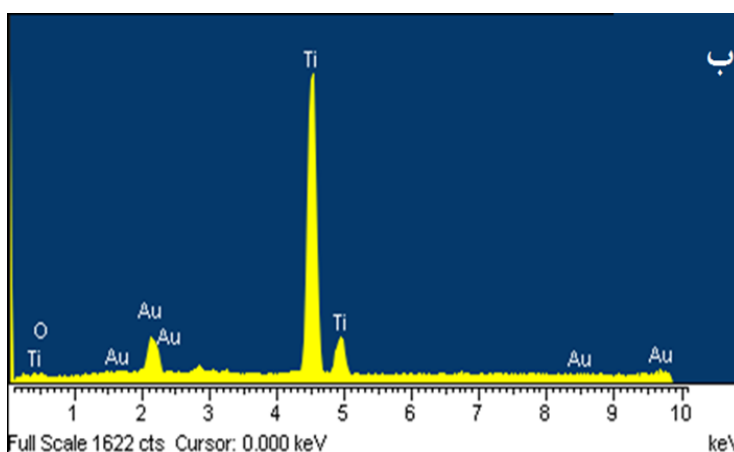
قابلیت ترشوندگی خوب آن و چگالی تقریباً یکسان با آلیاژهای آلومینیوم، به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شد. پودر هیدرید تیتانیوم با ترکیب نشان داده شده در جدول ۲ به عنوان عامل فوم‌سازی استفاده شد که برای بهبود رفتار آزاد شدن گاز، به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفت [۱۵]. همان‌گونه که در آنالیز EDS پودرهای هیدرید تیتانیوم قبل و بعد از عملیات حرارت می‌شود، در اثر انجام عملیات حرارتی یک لایه اکسیدی روی سطح ذرات هیدرید تیتانیومی تشکیل خواهد شد (شکل ۲). این لایه اکسیدی، نه تنها دمای آزاد شدن گاز از ذرات را به تاخیر می‌اندازد، بلکه فواصل زمانی بین آزاد شدن مولکول‌های هیدروژن از ذرات هیدرید تیتانیوم را نیز به تاخیر می‌اندازد که می‌تواند زمان در دسترس برای انجام فرایند فوم‌سازی را افزایش دهد [۱۶].

تاکنون پژوهش‌های جامعی در جهت تولید فوم نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات، با کمک امواج مافوق صوت و بررسی‌های ریزساختاری و نقش آن در پدیده ریزش صورت نگرفته است. از این رو هدف از انجام این پژوهش، تولید فوم نانوکامپوزیتی سلول بسته با استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیم به روش ذوبی و با کمک امواج مافوق صوت، مطالعه ریزساختار و پدیده ریزش در آن می‌باشد.

مواد و روش پژوهش

آلیاژ آلومینیوم با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ به عنوان ماده زمینه انتخاب شد. برای انتخاب یک تقویت کننده مناسب برای نانوکامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات، فاکتورهای مهمی مانند چگالی، ترشوندگی و واکنش‌پذیری شیمیایی در دماهای بالا بایستی در نظر گرفته شود [۱۴]. بر این اساس، اکسید سیلیسیم به خاطر





شکل ۲- نتیجه آنالیز EDS پودرهای هیدرید تیتانیم. الف) قبل، ب) بعد از عملیات حرارتی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه.

عنصر	Al	Sn	Pb	Ni	Cr	Ti	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
درصد وزنی	باقیمانده	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۳	۱/۴۶	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۸۳	۱/۱۶	۸/۶۲

جدول ۲- مشخصات پودر هیدرید تیتانیم استفاده شده به عنوان عامل فوم سازی.

فرمول شیمیایی	چگالی (g/cm^3)	جرم مولی (g/mol)	خلوص (%)
TiH ₂	۳/۷۶	۴۹/۸۸	>۹۸

مدت ۱ دقیقه به وسیله همزن مکانیکی هم زده شد. سپس مخلوط در دمای $10 \pm 660^\circ\text{C}$ به مدت ۲ دقیقه نگه داشته شد تا هیدرید تیتانیم تجزیه شده و تولید گاز هیدروژن نماید. در ادامه فوم تولید شده از کوره خارج و در هوا خنک شد.

بمنظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع نانوذرات اکسید سیلیسیم در فوم نانوکامپوزیتی حاصل، بررسی-های میکروسکوپی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1450VP (35kV) و میکروسکوپ نوری Olympus انجام گرفت. محاسبه سطح منطقه پلاتو و ضخامت دیواره‌های سلول برای بررسی پدیده ریزش، با استفاده از نرم افزارهای آنالیز تصویر MIP و AutoCAD انجام گرفت. برای این منظور، مطابق آن چه در شکل ۴ نشان داده شده است، مرکز منطقه پلاتو به کمک سه خط که از وسط دیواره‌های سلول منتهی به منطقه پلاتو می-گذرند مشخص شد، سپس یکی از آنها امتداد داده شده و در راستای آن خط دایره‌ای رسم شد که بر منطقه پلاتو

برای تولید محصول فومی، ابتدا شمش آلیاژی در کوره‌ای با دمای 750°C ذوب شد و بمنظور افزایش ترشوندگی ذرات سرامیکی، ۳/۵ درصد وزنی آلیاژ Al-Mg به مذاب اضافه شد. سپس ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم با میانگین ابعاد ۴۰ نانومتر با استفاده از تکنیک ریخته‌گری گردابی^۱ در دمای $680-650^\circ\text{C}$ و با سرعت ۷۰۰ دور بر دقیقه به آلومینیوم مذاب اضافه شدند. پس از اینکه مذاب به مدت کافی به کمک همزن مکانیکی هم زده شد، پروب دستگاه آلتراسونیک مدل BANRY، مطابق آن چه در شکل ۳ نشان داده شده است، وارد مذاب شده و با فرکانس ۲۰ kHz به مدت ۱۵-۱۰ دقیقه مذاب را متلاطم کرد تا فرایند ترشوندگی و پخش نانو ذرات در مذاب آلیاژی را بیش از پیش بهبود ببخشد.

پس از آن، پودر هیدرید تیتانیم پیش عملیات حرارتی شده، به مذاب اضافه شد و مخلوط بلافاصله به

^۱ - Stir Casting

خوبی نشان می‌دهد، توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید سیلیسیم در دیواره سلول‌ها را نیز بازگو می‌کند. این یکنواختی در پراکندگی نانوذرات سرامیکی در زمینه آلیاژ، ناشی از اثرات حفره‌زایی امواج مافوق صوت در ماده می‌باشد که می‌تواند با اعمال انرژی، نانو ذرات کلوخه‌ای شده در زمینه را از یکدیگر جدا کرده و آنها را در مذاب پراکنده کند.

یکی از مهمترین اثرات دیده شده در روش فوم سازی ذوبی، پدیده ریزش مذاب در حین فرایند فوم سازی می‌باشد که نه تنها باعث تغییر در اندازه سلول‌ها و ضخامت دیواره‌های سلول می‌شود بلکه سبب می‌شود بخشی از مذاب، بدون اینکه فوم شود، در انتهای نمونه تجمع کند (شکل ۹). برای بررسی پدیده ریزش از راه محاسبه ضخامت دیواره‌های سلول و مساحت منطقه پلاتو مطابق آنچه در تصویر ۹ دیده می‌شود، چهار نقطه در راستای ارتفاع نمونه فومی انتخاب شد.

برای محاسبه ضخامت دیواره‌های سلول و مساحت منطقه پلاتو در هر یک از این چهار نقطه، مانند آنچه در شکل ۱۰ برای یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است، ابتدا منطقه پلاتوی هر سلول به کمک نرم افزار اتوکد شناسایی شد، سپس ضخامت دیواره‌های سلول منتهی به آن مناطق بصورت مجزا به کمک نرم افزار MIP محاسبه گردید.

پس از جدا شدن منطقه پلاتو، برای بدست آوردن ضخامت دیواره‌های سلول منتهی به منطقه پلاتو، مطابق آنچه در شکل ۱۱ نشان داده شده است عمل کرده و متوسط ضخامت سه دیواره سلول مجاور هر منطقه پلاتو، برای هر یک از چهار نقطه نشان داده شده در شکل ۹، محاسبه شد.

در شکل ۱۲ تغییر ضخامت دیواره‌های سلول منتهی به منطقه پلاتو در ارتفاعات گوناگون نمونه فومی (مطابق با نمونه نشان داده شده در شکل ۹)، رسم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، با حرکت از سطح نمونه فومی به سمت کف آن، ضخامت دیواره‌های سلول مجاور منطقه پلاتو کمتر می‌شود.

برای رسم تغییرات مساحت منطقه پلاتو در شکل ۱۳، از دو روش استفاده شد: روش محاسبه عددی به کمک رابطه ۱ و آنالیز تصویر به کمک نرم افزار MIP. در

مماس خواهد شد. شعاع این دایره به عنوان شعاع منطقه پلاتو تعریف می‌شود [۱۷].

نتایج بدست آمده در رابطه ۱ قرار داده شده و سپس مقادیر بدست آمده از این رابطه با نتایج بدست آمده به کمک آنالیز MIP مقایسه شد.

$$A = 0.161r^2 + 1.732rh + 0.432h^2 \quad (۱)$$

در این رابطه A سطح منطقه پلاتو، r شعاع منطقه پلاتو و h ضخامت دیواره‌های سلول می‌باشد [۱۷].

چگالی نسبی و درصد تخلخل نمونه‌های تهیه شده با کمک روابط ۲ و ۳ محاسبه شد:

$$\rho_f / \rho_s = \text{چگالی نسبی} \quad (۲)$$

$$\text{درصد تخلخل} = [1 - (\rho_f / \rho_s)] \times 100 \quad (۳)$$

که ρ_f چگالی فوم آلومینیومی و ρ_s چگالی آلیاژ آلومینیوم است [۱۸].

نتایج و بحث

در شکل ۵ یک تصویر از مقطع عرضی فوم سلول بسته تولید شده با چگالی نسبی ۰/۱۲ و درصد تخلخل ۸۸٪ دیده می‌شود. مشاهده ریزساختار نوری فوم تولیدی، گویای ساختار چند وجهی سلول‌ها در محصول می‌باشد. همان‌گونه که در تصویر ۵ و تصویر ۶ که از مرز سه سلول گرفته شده است، دیده می‌شود دو سلول مجاور، یک دیوار و سه سلول مجاور، یک منشور انحنادار را به اشتراک می‌گذارند که منطقه پلاتو^۱ نامیده می‌شود. در بعضی نقاط تعدادی حفره کروی کوچک دیده می‌شود که ناشی از حبس گاز در مرحله کامپوزیت سازی بوده و افت خواص در محصول نهایی را سبب می‌شود، اما در این کار به خاطر اثر گاز زدایی ناشی از امواج آلتراسونیک، این حفرات در مقایسه با پژوهش انجام شده به وسیله سانگ^۲ و همکارانش [۱۹-۲۰] که در شکل ۷ نشان داده شده است، بسیار کم می‌باشند که این اثر تا حد زیادی به بهبود خواص فوم، کمک خواهد کرد.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۸ که از مرز دیواره سلول گرفته شده است علاوه بر این که نقش ذرات در پایداری دیواره‌های سلول را به

^۱ - Plateau border

^۲ - Song

می‌یابد (این رفتار در سه نمونه دیگر نیز به‌گونه مشابه دیده شد). این اثرات می‌توانند ناشی از گرانش مذاب و گرادیان فشار وابسته به نیروهای موینگی در خلاف جهت نیروی گرانش باشند [۱۷].

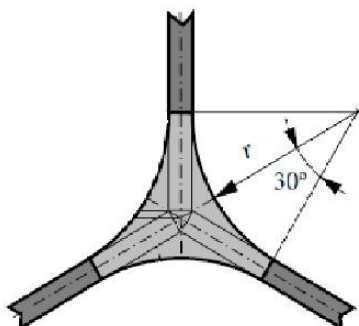
عملکرد همزمان این دو اثر، یعنی کاهش ضخامت دیواره‌های سلول و افزایش مساحت منطقه پلاتو می‌تواند باعث به هم پیوستن حفرات شده که در قسمت‌های نزدیک به انتهای نمونه باعث تشکیل حفرات مرکزی بسیار بزرگ خواهد شد. اگر پارامترهایی مانند زمان، دما و ویسکوزیته مذاب در فرایند فوم‌سازی به خوبی کنترل نشوند، این پدیده شدت یافته و باعث ته نشین شدن مذاب و فروریختن دیواره‌های سلول می‌شود.

روش محاسبه مساحت به کمک نرم افزار MIP، ابتدا منطقه پلاتوی هر سلول به وسیله نرم افزار اتوکد شناسایی و سپس مساحت آنها با کمک شمارش تعداد پیکسل‌های تصویر به وسیله نرم افزار MIP، آنالیز شد. اختلاف دیده شده در این دو منحنی می‌تواند ناشی از خطای کاربر هنگام جدا کردن منطقه پلاتو به وسیله نرم افزار اتوکد و یا فرضیاتی باشد که برای ساده سازی محاسبه مساحت منطقه پلاتو با روش عددی، در نظر گرفته شده است.

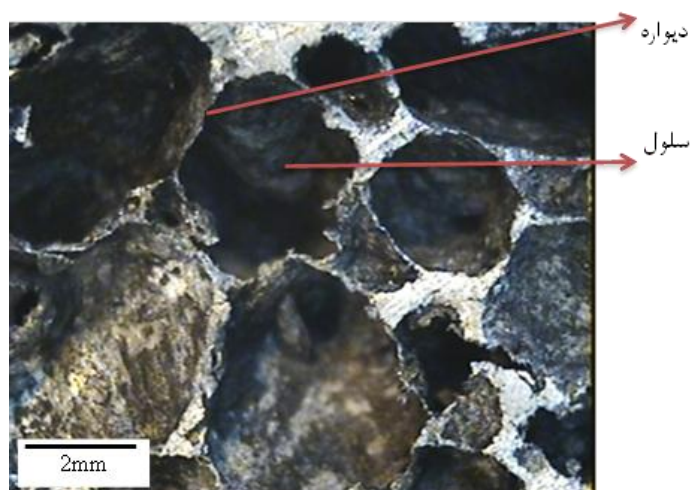
همان‌گونه که در نمودارهای رسم شده در شکل ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود، با حرکت از سطح فوم به سمت کف آن همزمان با کاهش ضخامت دیواره‌های سلول منتهی به منطقه پلاتو، مساحت منطقه پلاتو به‌گونه معکوس افزایش



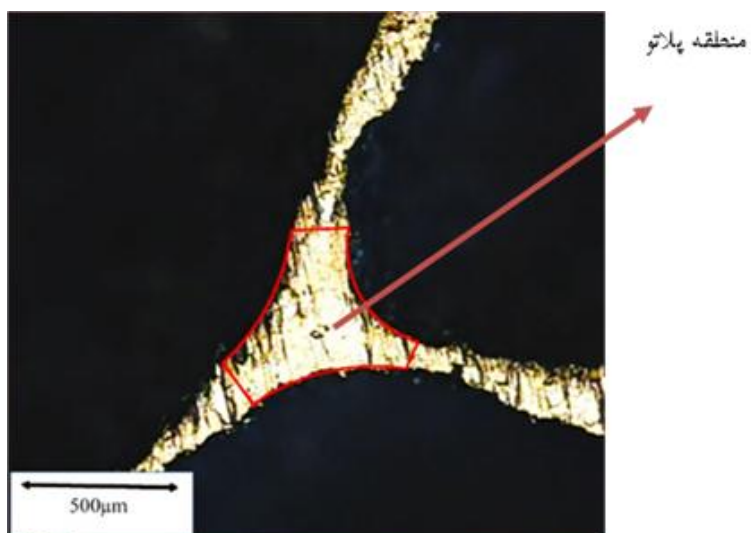
شکل ۳- دستگاه آلتراسونیک استفاده شده برای پخش نانو ذرات در مذاب.



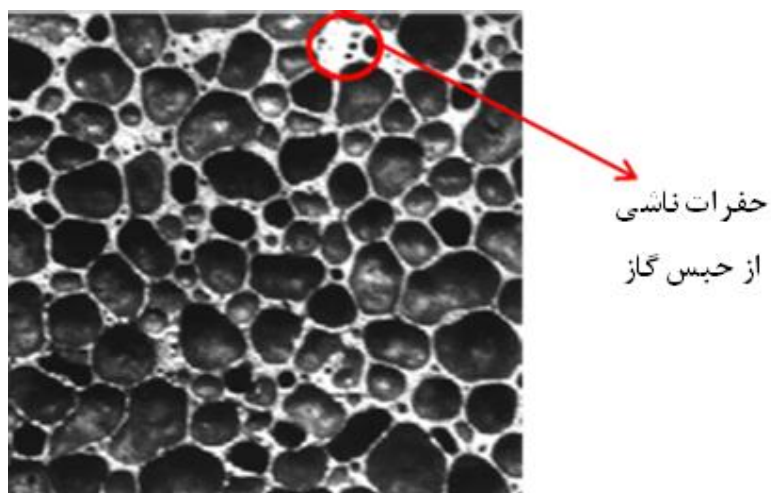
شکل ۴- روش محاسبه شعاع منطقه پلاتو [۱۷].



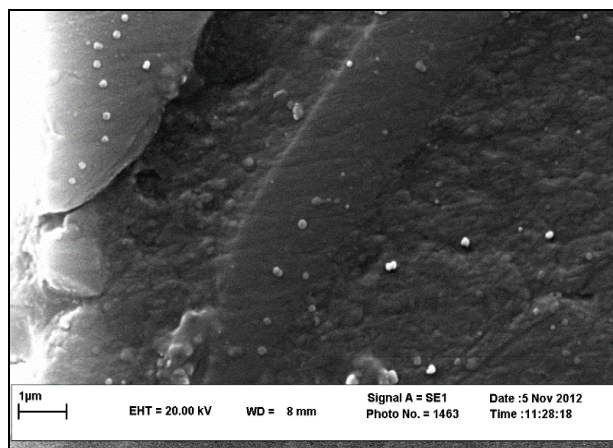
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری از فوم سلول بسته تولید شده به روش ذوبی.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری از مرز سه سلول متصل شده به یکدیگر.



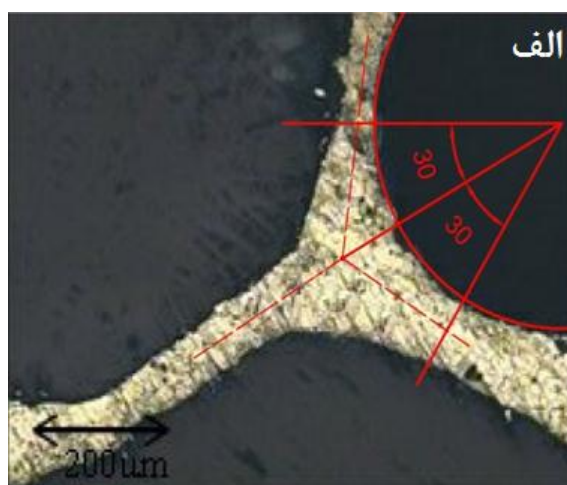
شکل ۷- فوم سلول بسته آلومینیومی ساخته شده به وسیله سانگ و همکارانش [۲۰].

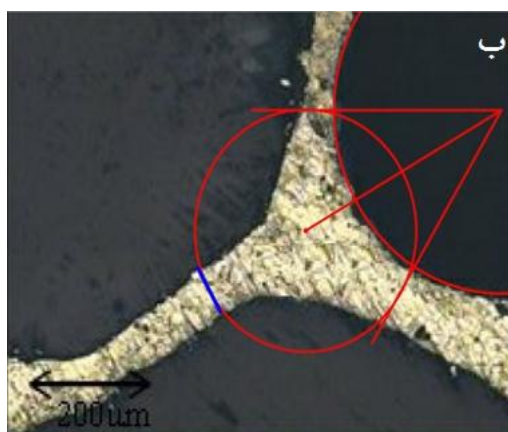


شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیواره سلول در مجاورت حفره، در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر.

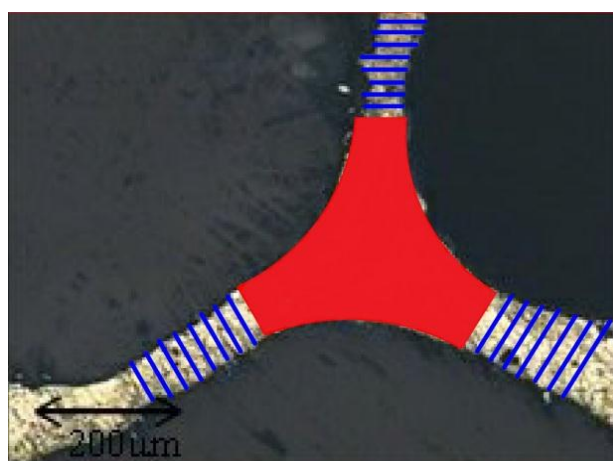


شکل ۹- تصویر ماکروسکوپی از مقطع طولی فوم ریخته‌گری شده به روش ذوبی.

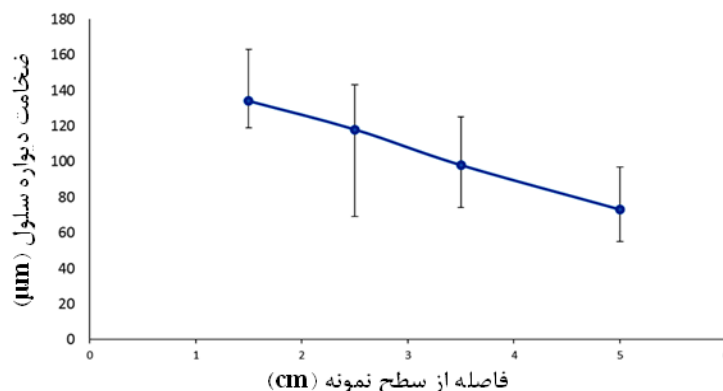




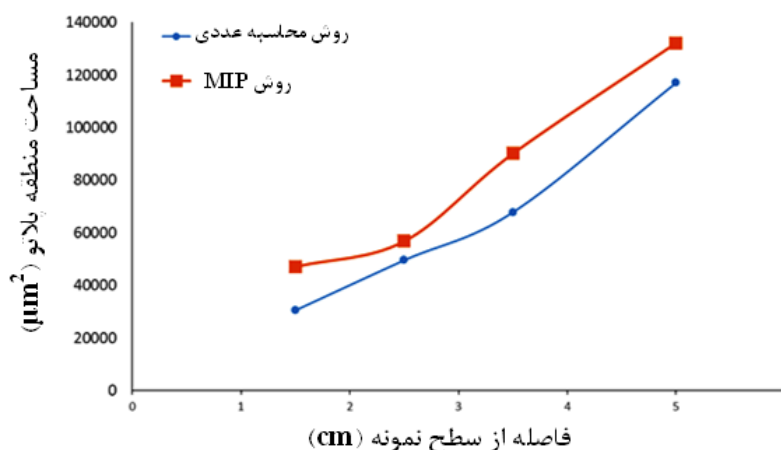
شکل ۱۰- مراحل بدست آوردن منطقه پلاتو با کمک نرم افزار اتوکد.



شکل ۱۱- محاسبه ضخامت دیواره‌های سلول به کمک نرم افزار MIP.



شکل ۱۲- تغییر ضخامت دیواره‌های سلول منتهی به منطقه پلاتو با فاصله گرفتن از سطح نمونه.



شکل ۱۳- تغییر مساحت منطقه پلاتو با فاصله گرفتن از سطح نمونه.

نیروهای گرانش و مویینگی در راستای ارتفاع نمونه فوم شده، باشد.

تشکر و قدردانی

بخشی از مراحل تولید فوم در آزمایشگاه جهاد دانشگاهی مشهد انجام شده است، از این رو از جناب آقای مهندس مصطفی ملک جعفریان و همکاران ایشان برای کمک در پیشبرد این کار تقدیر و تشکر می‌گردد.

References

1. N. Ramakrishnan, "An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites", Acta Materialia, Vol. 44, pp. 69-77, 1996.

نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی با استفاده از ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیسیم و با استفاده از تکنیک‌های ریخته‌گری گردابی و امواج مافوق صوت تهیه شد. سپس فوم نانوکامپوزیتی $Al-SiO_2$ به-وسیله عامل فوم ساز هیدرید تیتانیم تولید گردید. ساختار چند وجهی سلول‌ها در محصول تولیدی و همچنین توزیع مناسب و یکنواخت نانو ذرات در زمینه نانوکامپوزیت حاصل، گویای موفقیت در تولید فوم نانوکامپوزیتی بود و آنالیزهای انجام شده بر روی تصاویر، وقوع پدیده ریزش که یکی از موضوعات مرتبط با فوم‌های ریخته‌گری شده به روش ذوبی می‌باشد را در نمونه نهایی نشان داد. پیش‌بینی می‌شود این پدیده می‌تواند ناشی از عملکرد همزمان

12. J. Wang, Z. He, J. Wu, and Z. Wan, "Effect of ultrasonic wave on melt foaming process of aluminum foam", *Advanced Materials Research*, Vol. 97-101, pp. 227-230, 2010.
13. K. S. Suslick, Y. Didenko, and M. Fang, "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 357, pp. 335-353, 1999.
14. S. Donthamsetty, and N. Rao, "Investigation on mechanical properties of A356 nanocomposites fabricated by ultrasonic assisted cavitation", *Mechanical Engineering*, Vol. 41, pp. 121-129, 2010.
15. K. Kadoi, N. Babcsán and H. Nakae, "Heat treatment of TiH₂ powder to control decomposition phenomenon for aluminum foam fabrication by melt route", *Materials Transactions*, Vol. 50, pp. 727-733, 2009.
16. B. Matijasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke and N. Wanderka, "Modification of titanium hydride for Improved aluminum foam manufacture", *Acta Materialia*, Vol. 54(7), pp. 1887-1900, 2006.
17. V. Gergely, and T.W. Clyne, "Drainage in standing liquid metal foams: modeling and experimental observations", *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 3047-3058, 2004.
18. B.Y. Hur, S.J. Park, K.H. Song, W.H. Lee, S.H. Park and S.Y. Kim, "Foaming characterization reological, thermal mechanical properties of Al alloy foam", *Advanced Metallic Materials International Conference, Slovakia*, pp. 120-123, 2003.
19. Z. Song, J. Zhu, L. Ma, and D. He, "Evolution of foamed aluminum structure in foaming process", *Materials Science and Engineering*, Vol. 298, pp. 137-143, 2001.
20. Z. Song, "Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process", *Materials Science*, Vol. 35, pp. 15-20, 2000.
2. J. Hashim, L. Looney, and M.S.J. Hashmi, "The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy", *Materials processing Technology*, Vol. 119, pp. 324-328, 2001.
۳. م. گلستانی پور و م. توکلی، "بررسی جذب انرژی پندل-های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، *مجله مواد نوین*، جلد ۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۲۵، زمستان ۹۱.
4. David C. Curran, "Aluminum foam production using calcium carbonate as a foaming agent", ph. D. Thesis University of Cambridge, United Kingdom, 2003.
5. S. W. IP, Y. Wang and J. M. Togury, "Aluminum foam stabilization by solid particles", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 38, pp. 81-92, 1999.
6. P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev, A.V. Nguyen, and N.G. Vilkovala, "Foam drainage", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 13, pp. 163-170, 2008.
7. K.M. Mussert, W.P. Vellinga, A. Bakker, and S. Van Der Zwaag, "A nano-indentation study on the mechanical behavior of the matrix material in an AA6061-Al₂O₃ MMC", *Materials Science*, and Vol. 37, pp. 789-794, 2002.
8. Y. Yang, J. Lan, and X. Li, "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 380, pp. 378-383, 2004.
9. M. C. Torres, "Generation of heterogeneous cellular structures by sonication", ph. D. Thesis University of Heriot-Watt, United Kingdom, 2008.
10. K. S. Suslick, "The chemical and physical effects of ultrasound", *Scientific American*, pp. 80-86, 1989.
11. Y. Yang, and X. Cheng, Xiaochunli, "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites", *Materials Science*, Vol. 39, pp. 3211-3212, 2004.

